

画像の輝度平均情報を用いた高速な運動計測手法の提案

○関口 和人 (電気通信大学大学院), 野嶋 琢也 (電気通信大学大学院)

High-speed motion measurement method using average image data intensity

○Kazuhito SEKIGUCHI (IS, UEC), and Takuya NOJIMA (IS, UEC)

Abstract: In this paper, we present a high-speed motion measurement method using average image data intensity. By this method, we aim to capture high-speed motion using optical average image data intensity and CMOS linear sensors. We verified performance of the prototype by evaluation experiments.

本研究では、周辺環境の輝度変化を利用した高速運動計測手法を提案する。提案手法は、光学平均手法とリニア CMOS センサを利用することで、1次元ながら高速な運動の計測を目指すものである。今回は、この手法を用いたシステムを試作し、評価実験を通してその妥当性を検証した。

1. 序論

運動計測装置は、映画やゲーム等でキャラクタ動作の生成や、スポーツプレーヤーの身体動作の解析等、幅広い分野で利用されている。しかしながら計測装置の限界から、屋外でかつ広範囲・高速で移動する人物の運動計測には困難が伴う。野球を例に挙げると、外野手は試合中、数十 m 四方の範囲を移動して捕球し、時速 100km 以上で返球を行なっている。すなわち、野球外野手の場合であれば、10 m 単位での長距離の身体移動、および時速 100km 以上の指先運動が同時に行われていることになる。このように、スポーツ選手は競技場などの広大な領域を動き回るため、計測範囲には制限があってはならず、また超高速の運動を捉えるためには、高い時間分解能を持つ運動計測を行う必要がある。さらに、未知の環境で使用する場合、環境情報の収集や機材の設置といった事前の準備も必要となる。またスポーツ選手に使用するには、使用者の運動を阻害することがないように、取り付ける装置はできるだけ小型であることが望ましい。

既存の運動計測手法としては HiBall[1], Phasespase[2] などが挙げられる。これらの装置で上記の運動を測定することを想定すると、前者は高精度な運動計測が可能であることを特徴としているが、一方で天井に多数の LED マーカを設置する必要があり、計測対象の動作範囲は大きく制限される。後者は高速な運動計測を行いつつ広範囲の計測にも対応できるが、高価なカメラを複数台設置する必要があり、導入の敷居が非常に高

くなる。さらに、両者に共通する問題として機材設置の事前準備の必要があり、使用者にとってはどちらも手軽に利用できるものではない。

本研究では、使用者に取り付けられた光学センサからの輝度平均情報を利用した高速な運動計測手法を提案する。環境下の輝度変化情報を利用して運動計測を行うため、運動測定に利用するパラメータはその都度周辺から取得する。よって、事前の環境データ取り込みやマーカ設置などは必要なく、従来研究で見られた計測範囲の問題などの環境による制限が非常に少ない。本稿ではより高速に運動計測を行う手段として、リニア CMOS・光学輝度平均により輝度情報の 1次元化を行う方法を述べる。また、作成したシステムで 1次元運動の計測を行い、その高速性を検証する。

2. 関連研究

本章では、運動計測を目的とした従来手法を紹介する。

HiBall は、観測対象に受光素子を内蔵した小型のセンサを取り付け、室内の天井に多数配置された LED の情報からセンサの位置や姿勢を推定するシステムである。取り付けるセンサは 500g 程度の小型なものであり、使用者の運動への影響が小さい。測定可能な範囲は 5.5m × 8.5m であり、この部屋の天井には総数約 2000 個の LED が配置されている。

このシステムでは対象を高速にトラッキングすることができ、リフレッシュレート 2kHz で位置推定が可能である。また、実験では水平位置誤差 0.5mm, 姿勢誤差 0.02° で位置推定可能であった。

このように、このシステムは高速かつ高精度で位置推定可能であるという特徴を持つ。しかし、欠点とし

てLEDを設置した施設内でしか使用できず、広大な測定範囲を確保するのは非常に困難であるという点が挙げられる。また測定には赤外線を利用するため、環境光などの外乱が強い屋外で使用することはできない。

Phasespace は市販されているモーションキャプチャの一種で、観測対象に取り付けられたLEDマーカをカメラで観測することで対象の位置を推定する。

このシステムでは同時に複数個のマーカを測定でき、これらを人間の関節などに取り付けることで全身の動作をキャプチャすることができる。測定範囲は8.0m×8.0m程度に設定できる。また、最大リフレッシュレートは960Hzである。

しかしこのシステムは、カメラの測定範囲外に出してしまうと運動計測が不可能になるため、広範囲の測定にはカメラ台数の確保が不可欠である。本体の価格も高価であるため、測定範囲の拡大に伴い、必要な予算や事前の準備が大規模になる。よって、広範囲な運動測定を必要とする未知環境においては適した手法ではない。

Disney Research Pittsburgh と Carnegie Mellon University では、人間の手足関節などにカメラを取り付け、全身の動作をキャプチャするシステムを開発した[3]。使用者の身体の中心部に取り付けたカメラを親とし、これに対して末端に取り付けられた子カメラは親カメラとの相対的な位置・姿勢を検出する。また親カメラが全体を撮影することで、使用者の移動・運動等を測定することができる。

このシステムは先に挙げた手法と異なり、周囲の環境にセンサやマーカを設置する必要がないため、場所を選ばず運動計測を行うことができる。また、取り付けるカメラが小型であるため、使用者の運動に与える影響が小さいという利点がある。しかし、事前に緻密なキャリブレーションが必要である、複数個の高価なカメラを用いる必要がある、カメラのフレームレートは60Hzであるため高速な運動計測には適さない、といった欠点がある。よって本研究のように、広範囲かつ高速に運動計測を行うことを目的とした運動計測手法とは言い難い。

3. 原理

前回の報告では、我々は自己位置推定手法に市販のWebカメラを用いるシステムを提案した[4]。方法としては、Webカメラを移動させた前後で、得られた画像から輝度情報を比較し、それらの相関をとることで位置を推定するというものであった。ここでは輝度情報を一方向に平均化することでデータ量を削減させ、

計算量を低減することを試みた。輝度情報の平均化により1次元の移動量計算に限定されるものの、従来研究による方法より高速に運動を計測することが可能になる。また、本手法はカメラ映像からの単なる輝度変化により運動計測を行うため事前の準備が必要なく、環境に制限されることがない。

Fig. 1のように、縦、および横のピクセル数が N_x, N_y の画像を考え、 n フレーム目で得られた画像における座標 (x, y) での輝度を $I_n(x, y)$ とおく。ここで、 $I_n(x, y)$ を y 軸方向に加算した値 $A_n(x)$ は式(1)のように表される。また A_n を式(2)以下のように定義する。

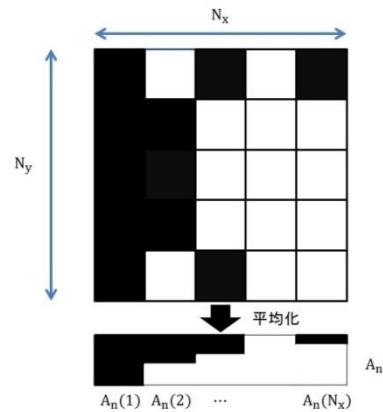


Fig. 1 輝度情報の平均化

輝度情報の平均化について、次のように考える。

Fig. 1のように、縦、および横のピクセル数が N_x, N_y の画像を考え、 n フレーム目で得られた画像における座標 (x, y) での輝度を $I_n(x, y)$ とおく。ここで、 $I_n(x, y)$ を y 軸方向に加算した値 $A_n(x)$ は式(1)のように表される。また A_n を式(2)以下のように定義する。

$$A_n(x) = \sum_{i=0}^{N_y} I_n(x, i) \quad \dots \text{式(1)}$$

$$A_n = [A_n(0), A_n(1), \dots, A_n(N_x)] \quad \dots \text{式(2)}$$

次に、 A_n と A_{n-1} との相関 R_n を求める。 A_n のずれ量を j 、その相関を $R_n(j)$ とおくと、 $R_n(j)$ は以下のように求められる。

$$R_n(j) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N_x-(j+1)} A_n(i) \cdot A_{n-1}(i-j) & (j \geq 0) \\ R(-j) & (j < 0) \end{cases} \quad \dots \text{式(3)}$$

ただし、 $-N_x \leq j \leq N_x$ である。 $R_n(j)$ が最大となるような j を n フレーム目での画像上の移動量とする。

最後に、画像移動量を実世界での移動量に変換する。各パラメータを Table. 1 のように表せば、変換のための式は式(4)のように表される。

Table. 1 パラメータ詳細

パラメータ	詳細	単位
T_r	実世界でのカメラ移動量	mm
S_p	カメラ素子の大きさ	mm
S_i	画像の撮影範囲	mm
f	焦点距離	mm
D	撮影距離	mm
W	画像のピクセル量	pix
T_i	画像上の移動量	pix

$$T_r = \frac{S_p}{f \times S_i} \times \frac{D}{W} \times T_i \quad \dots \text{式(4)}$$

以上より、画像の輝度平均情報からカメラの運動を測定することができる。

4. 高速化のための課題

運動計測には、計測対象から位置や速度などの情報を取得し、それを計算する、という処理が行われる。スポーツ選手の手先運動のように高速で移動する対象の運動を計測するためには、情報取得と計算処理のどちらも高速に行われなければならない。つまり、計算量をできるだけ削減すること、情報を高速に取得することが求められる。本章では、これらの課題の解決法を述べる。

4. 1. 計算量の削減

本研究の目的は高速な運動測定を実現することであるため、移動量推定のために行う計算は極力少なくしなければならない。提案手法の原理には、画像の輝度情報を一方向に平均化する処理が含まれているが、この処理を計算機で行うと高速性の妨げとなることが考えられる。

そこで、本稿ではシリンダリカルレンズを用いることでこの問題を解決する。シリンダリカルレンズは通

常のレンズとは異なり、特定方向のみの収縮を行う特性を持っている。このレンズで結像した画像をカメラに読み取らせることで、輝度情報の平均化を計算ではなく光学的に行うことができ、計算による処理速度の低下を防ぐことができると考えられる。

4. 2. 情報の高速な取得

提案手法において高速に運動を計測するためには、輝度情報の取得も高速に行われなければならない。そのため、カメラのフレームレートは非常に重要な問題となる。

そこで本稿では、リニア CMOS センサを使用することを提案する。リニア CMOS センサは受光素子が1列に並んでおり、縦方向の解像度が1のセンサである。このセンサの特徴としてフレームレートが高速であることが挙げられ、中にはビデオレート 35kHz で撮影可能なものも存在する[5]。前述のシリンダリカルレンズで線状に結像させた画像をリニア CMOS センサで読み込ませることで、高速なフレームレートを確保しつつ輝度情報の平均化を光学的に行うことができる。

5. 実験装置

作成した装置の外観写真を Fig. 2 に示す。

図に示されるように、リニア CMOS センサの前面にシリンダリカルレンズを配置した。なお、シリンダリカルレンズの焦点とリニア CMOS センサの受光素子の並び、および距離が一致するようにこれらを固定した。レンズとセンサの周辺は外部の環境光を受光しないようにカバーで覆い、シリンダリカルレンズ前面にはスリットを設置してピンホールカメラと同様の原理でセンサに受光させた。リニア CMOS センサへのクロックパルス供給には水晶発振器を使用した。リニア CMOS センサ、水晶発振器への電源供給にはマイコンボードを用いた。センサより得られた値の PC への取り込みには AD ボードを使用した。AD ボードによる PC へのデータ取り込み、移動量計算を行うプログラムは C++ で記述した。使用した機材を Table. 2 に示す。

Table. 2 機材詳細

機材名称	詳細
リニア CMOS センサ	浜松ホトニクス S10077

シリンジカルレンズ	酒井硝子エンジニアリング 00800004
水晶発振器	京セラキンセキ EXO-3
マイコンボード	Arduino UNO
AD ボード	インターフェース CSI-320110

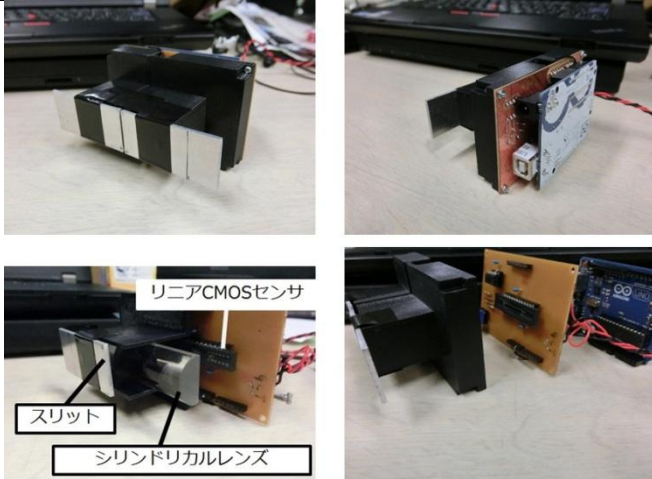


Fig. 2 実験装置外観. それぞれ, 左上: 装置前面, 右上: 背面, 左下: 内部, 右下: 部品一覧を示す.

6. 評価実験

本システムに求められる要件は高速な運動計測ができることである. つまり, 高い時間分解能をもつこと, 実空間における移動量に比例した画像上の移動量が得られることを検証する必要がある, 本論文ではその一方である時間分解能に関する検証を行った.

今回使用したリニア CMOS センサは, 最大 972fps でデータ読み出しが可能である. よって本手法による運動計測も同じく 972fps で行われることが望ましい. 本章では, この数値を高速化の目標値とし, 実際に高速な運動が計測できるか, 計算速度が十分に高速であるかの2点を検証する実験を行った.

6. 1. 運動計測実験

作成した装置を用いて1次元運動の計測実験を行った. 装置の運動方向を1方向に制限するため, 装置をスライドレールに固定した. 使用したスライドレールと固定された装置の外観および構成の上面図を Fig. 3, Fig. 5 に示す. なお, センサ前方の受光領域には, Fig. 4 に示すような縦縞の画像をセンサと平行になるように配置した. Fig. 5 に示されるように, センサと画像の距

離は 350mm, 実空間での移動距離は 150mm とした. 装置の動力として市販の輪ゴムを束ねたものをスライドレールに固定し, ゴムの復元力によって高速な運動を発生させた.

実験では, 装置によって装置自体の移動量を計測すると同時に, 外部のカメラで装置を撮影して実空間の移動量を観測した. 移動量観測は, 撮影した画像をコマ送りにし, フレーム毎の実験装置の位置を目視で確認することで行った.

結果を Fig. 6, Table. 3 に示す. Fig. 6 のグラフでは, 実験装置より得られた移動量と実際の移動量との比較が時系列ごとにまとめられており, Table. 3 の表では実際の移動距離と推定された移動距離が示されている.

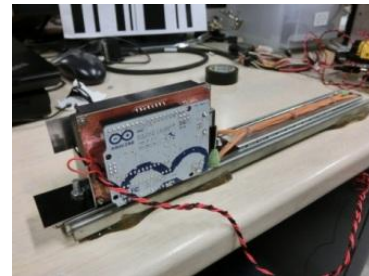


Fig. 3 実験装置外観



Fig. 4 実験で使用した画像

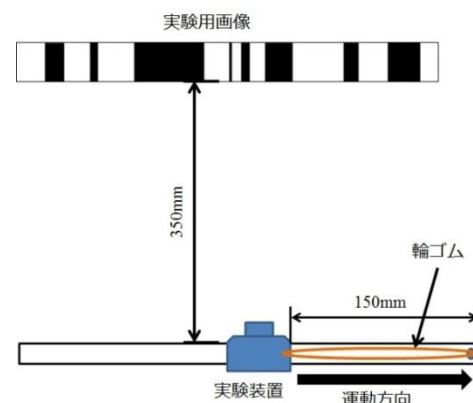


Fig. 5 実験装置構成の上面図

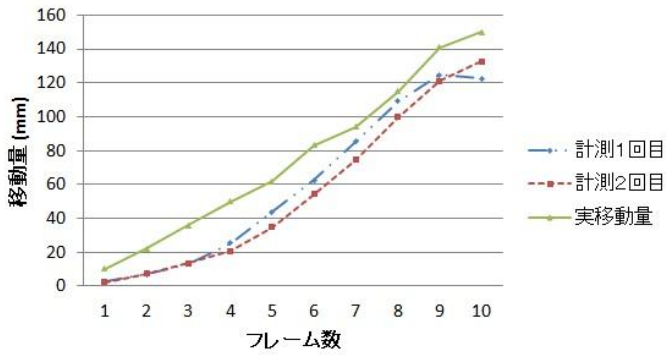


Fig. 6 実験結果

Table. 3 実際の移動距離と計測結果

	移動距離(mm)
計測 1 回目	124.8
計測 2 回目	121.0
実移動量	150.0

6. 2. フレームレート計測

ハードウェア・ソフトウェア両面から高速化が行われていることを検証するため、PC へのデータ読み込みと、移動量計算の2過程でフレームレートを計測した。フレームレートの算出は、各処理を 1000 回繰り返し、総経過時間を測定することで行った。結果を Table. 4 に示す。

Table. 4 各処理におけるフレームレートの比較

センサの動作速度	データ取得のフレームレート
972fps	480fps
901fps	882fps
	フレームレート
移動量計算	863fps

7. 考察

7. 1. 運動計測実験

第 6.1 節の実験では、概ね実際の移動距離に比例した結果が得られた。しかし実移動距離が 150mm だったのに対し、計算された移動量はそれぞれ 125mm, 121mm というように、誤差がみられた。誤差の要因として、光学系の設計に起因する問題が考えられ、これはスリットとレンズの問題に大別される。

まず前者については、今回の実験装置において、一般的なカメラに搭載されている絞り機構の代わりとして使用した。絞りは光量や被写界深度を決定する重要な要素だが、今回はスリットの配置や幅に関する厳密な検証を行わずに設置したため結像に失敗し、計測誤差の要因になったと考えられる。スリット幅を狭めれば空間的分解能は上昇するが、同時にセンサが受光する光量も減少し、輝度値の比較に必要な光量を確保できなくなる可能性がある。そのため、正確な運動計測のためには適したスリットの設計が必要であると考えられる。

後者についても、同じく適切な設計が必要であると考えられる。今回光学系設計の要件としたのはレンズの焦点距離のみであった。シリンダリカルレンズを斜めに通過する光は一般的なレンズと同じように屈折するため、スリットへの入射角が変化し撮影範囲が変化したことが考えられる(Fig. 7)。また、屈折によって映像が Fig. 8 のように歪む現象についても同じく考慮されていない。これにより、同じ映像であってもセンサ端と中央では光学輝度平均の結果が異なることが予想される。これらの現象が光学輝度平均の比較に影響を及ぼし、誤差の要因になったと考えられる。

後者についても、同じく適切な設計が必要であると考えられる。今回光学系設計の要件としたのはレンズの焦点距離のみであった。シリンダリカルレンズを斜めに通過する光は一般的なレンズと同じように屈折するため、スリットへの入射角が変化し撮影範囲が変化したことが考えられる(Fig. 7)。また、屈折によって映像が Fig. 8 のように歪む現象についても同じく考慮されていない。これにより、同じ映像であってもセンサ端と中央では光学輝度平均の結果が異なることが予想される。これらの現象が光学輝度平均の比較に影響を及ぼし、誤差の要因になったと考えられる。

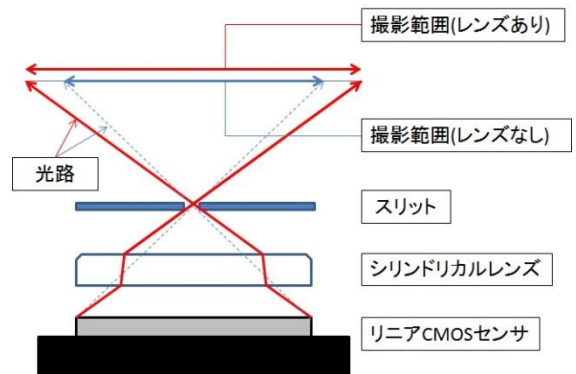


Fig. 7 屈折による撮影範囲の変化

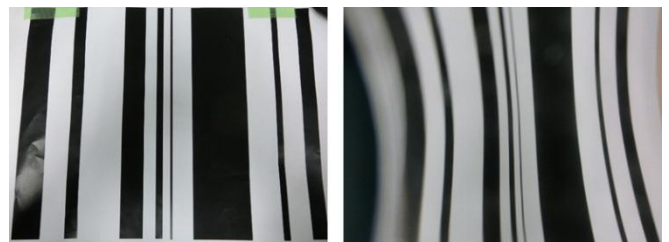


Fig. 8 レンズ通過後の画像の変化(左：レンズなし、右：レンズあり)

7. 2. フレームレート計測

センサの動作速度を限界である 972fps までフレームレートを上昇させたとき、フレームレートを落とした時よりも逆に処理速度が遅くなり、期待されるフレームレートの半分ほどに低下する現象が確認された。これはサンプリング終了後のデータ読み出しが直後のサンプリング開始までに完了せず、データ取得の周期が半減するためだと考えられる。この現象は、センサの動作速度を減少させてサンプリング終了後の読み出し時間を確保するか、PC もしくは AD ボードを変更してデータ読み出しをさらに高速で処理することで回避できると考えられる。

なお、移動量計算の処理速度は 863fps であった。仮に計算部分も別スレッドで動作させた場合でも、データ取得のフレームレートである 972fps より高速でなければフレームレートはそれに伴って減少する。解決方法として、プログラム内の記述を改善する他には、画像処理ユニット(Graphics Processing Unit, GPU)によって計算処理を簡略化することが挙げられる。GPU は簡単な計算処理を高速に行うことが可能であり、複雑な計算を行わない本手法においては、計算量をさらに低減させることが可能であると考えられる。

8. 結論

本稿では、リニア CMOS・光学輝度平均を用いた環境に依存しにくい高速な運動計測手法を提案し、作成した装置による運動計測の高速性について検証した。今後の課題としては、以下に述べる事が挙げられる。

まず、今回検証を見送った測定精度に関する検証実験を行う必要がある。また今回は 1 次元並進運動のみの計測に留めており、回転運動の測定精度に関する検証も必要である。

次に、実験装置の設計において光学系に関する厳密な検証を行うことも、今後の課題として挙げられる。実環境では満足な結果が得られなかったため今回の運動計測は人工的に準備された環境で行われた。よって実験条件は完全な自然特徴量のみとは言い難い。しかし[4]と同様に、原理的には自然特徴量のみで運動測定

可能であると考えられる。今後は光学系の設計を見直し、様々な環境での運動測定実験を行っていく。

参考文献

- [1]. Welch, Greg et al., "The HiBall Tracker: High-Performance Wide-Area Tracking for Virtual and Augmented Environments," pp. 1-10, 1999.
- [2]. Phasespace Inc., "PhaseSpace optical motion capture systems," [Online]. Available: <http://phasespace.com/>. [Accessed 10 10 2012].
- [3]. Takaaki Shiraori, Hyun Soo Parky, Leonid Sigal, Yaser Sheikhy, Jessica K. Hodgins, "Motion Capture from Body-Mounted Cameras," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, pp. 1-10, 2011.
- [4]. Kojiro Kato, Kris M Kitani, and Takuya Nojima, "Ego-motion analysis using average image data intensity," *Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference*, no. 9, 2011.
- [5]. 竹中システム機器株式会社, "ラインスキャンカメラ TL-16000CL," [Online]. Available: <http://www.takex-system.co.jp/product/line/tl-16000cl.html>. [Accessed 10 10 2012].